

I.dz.

Gliwice, 18.02.2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
mgr. inż. Piotra Łabuńskiego

pod tytułem:

**„Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji”**

podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego  
Łukasiewicza prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta nr RM-530-11-  
03/2024 z dnia 27.11.2024 r., do którego dołączono egzemplarz pracy  
doktorskiej.

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Lucjan Witek, prof. PRz.

## 1. Ocena aktualności wybranego tematu

W rozległej tematyce teorii drgań istotne miejsce zajmują problemy ich tłumienia. Tłumienie drgań jest jednym z przejawów rozpraszania energii mechanicznej nieodłącznie związanej z ruchem układów mechanicznych. Pomimo rozwoju nauki, metod badawczych i pomiarowych wciąż są to problemy najslabiej zbadane. Podstawową trudność stanowi niepełna znajomość procesów powodujących nieodwracalność przemian i związane z tym rozpraszanie energii przy drganiach. Przypadkowość i różnorodność przyczyn dyssypacji energii powodują, że dziedzina tłumienia drgań jest stale obszarem badań naukowych zarówno podstawowych, doświadczalnych i teoretycznych, jak i aplikacyjnych. Współcześnie stykamy się w sposób ciągły z wszelkiego rodzaju procesami wibroakustycznymi. Wysiłek konstruktorów i projektantów idzie w kierunku ograniczenia lub wyeliminowania źródeł emisji energii wibroakustycznej. Celem użytkowym wibroakustyki jest obniżenie poziomu zakłóceń wibroakustycznych maszyn, urządzeń. W wielu publikacjach naukowych cel ten jest ostatnio otrzymywany poprzez zastosowanie aktywnych metod redukcji, które to w wyniku wymagań sprzętowych, zastosowania dodatkowej aparatury pomiarowej, czujników i aktuatorów są znacznie droższe od metod pasywnych. Jak sam Autor zauważa we wstępie swojej dysertacji „najpowszechniejszym rozwiązaniem, stosowanym w celu rozproszenia energii wibracji, jest pokrycie drgającej powierzchni matą wykonaną z materiału lepkosprężystego. Zapewnia ona dużą skuteczność i jest niedroga w aplikacji”. Stąd szczegółowe poznanie mechanizmu rozpraszania energii materiałów wykorzystywanych w produkcji mat wibroizolacyjnych jak i identyfikacja dróg propagacji energii wibroakustycznej w strukturach mechanicznych zapewnia skuteczność ich zastosowania.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

## 2. Przegląd treści pracy

Rozprawę doktorską podzielono na sześć rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury, przedstawionymi symbolami i akronimami występującymi w pracy oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Rozprawa została napisana na 176 stronach maszynopisu formatu A4.

Pierwszy rozdział nazwany „Wstęp” stanowi krótkie wprowadzenie do treści zasadniczych analizowanych w ramach recenzowanej dysertacji. Autor w tym samym rozdziale zawarł cel i zakres pracy. Cel został scharakteryzowany jako numeryczno – eksperymentalna analiza wpływu rodzaju materiału tłumiącego oraz jego konfiguracji, temperatury pracy i geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji. Zakres pracy został przedstawiony w postaci struktury blokowej co czyni go przejrzystym, dostarczając informacji, co w poszczególnych rozdziałach zostało wykonane.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Przegląd literatury” Autor dokonał obszernego przeglądu literatury przedstawiając w nim źródła hałasu generowane w pojazdach samochodowych i samolotach. W dalszej części rozdziału zostały omówione rodzaje tłumienia oraz opisano własności tłumiące materiałów lepkosprężystych i sposoby ich modelowania. Następnie przedstawione zostały rodzaje analiz dynamicznych oraz metody estymacji parametrów modeli modalnych i materiałowych. Dokonano również przeglądu metod wibroizolacji stosowanych w przemyśle samochodowym i lotniczym. Rozdział zakończono podsumowaniem, w którym zawarto ciekawe spostrzeżenia i trafne wnioski. Uważam, że dopiero na ich podstawie powinien zostać sformułowany „Cel i zakres pracy”, który powinien stanowić odrębny rozdział.

W kolejnym, trzecim rozdziale, doktorant zawarł opis stanowiska badawczego, wykorzystanego w badaniach doświadczalnych. W dalszej części przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na zaproponowanym stanowisku badawczym. Badania przeprowadzono dla czterech rodzajów mat tłumiących. Dotyczyły: wpływu rodzaju materiału tłumiącego, jego konfiguracji oraz temperatury pracy na skuteczność pasywnej wibroizolacji. W celu obliczenia tego parametru w pracy zastosowano dwa podejścia. W pierwszym podzielono wartość amplitudy rezonansowej belki z tłumieniem przez odpowiadającą jej amplitudę rezonansową belki bazowej. Najmniejsze wartości względnej amplitudy świadczą o największej intensywności tłumienia. W drugim podejściu wykorzystano metodę połowy mocy. W ostatnim podrozdziale tego rozdziału zatytułowanym „Wpływ temperatury pracy na skuteczność pasywnej wibroizolacji” Doktorant prowadził dalsze badania na rozbudowanym stanowisku badawczym o komorę chłodzącą. Jest to Autorski projekt zezwalający na zbadanie wpływu temperatury pracy na skuteczność pasywnej wibroizolacji.

Rozdział czwarty recenzowanej dysertacji zatytułowany „Identyfikacja własności dynamicznych materiałów lepkosprężystych” dotyczył przedstawienia badań zmierzających do eksperymentalnego określenia współczynnika strat  $\eta^*$  i modułu zachowawczego  $E'$  dwóch materiałów lepkosprężystych (gumy butylowej i materiału bitumicznego). Dane materiałowe posłużyły do opracowania modelu materiału lepkosprężystego. W celu weryfikacji wyznaczonych stałych przeprowadzono analizę modalną oraz harmoniczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Obliczenia zostały przeprowadzone w środowisku ANSYS Workbench 2023 R2 przy pomocy modułu Mechanical.

Rozdział piąty poświęcono badaniom modelowym fragmentu kadłuba samolotu turbośmigłowego Bombardier Dash-8 Q400. Opracowano model MES powierzchni kadłuba wraz z matami tłumiącymi. Prowadzone symulacje dotyczyły wymuszeń harmonicznych. W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych określono wpływ geometrii materiału tłumiącego na jego zdolności dyssypacyjne. Rozważono osiem geometryczno-materiałowych konfiguracji wibroizolacji. W analizie tej wprowadzono dwa dodatkowe wskaźniki oceny pasywnej wibroizolacji, które oprócz oceny intensywności tłumienia uwzględniły także przyrost masy.

Rozprawa kończy się przedstawieniem wniosków końcowych oraz dalszym kierunkiem badań nad zagadnieniem pasywnej wibroizolacji w aplikacjach inżynierskich.

### 3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. W większości jej treść napisana jest poprawną polszczyzną chociaż zdarzają się nieliczne błędy stylistyczne. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od zagadnień podstawowych jak omówienie rodzajów tłumienia, modeli matematycznych służących do ich opisania do zagadnień ściśle związanych z pracą.

Analizując istniejący stan wiedzy, Autor zauważa, że co prawda tematyka podjęta w dysertacji nie jest nowa, niemniej jednak nie została wyczerpująco opisana. W szczególności w zakresie:

- określenia oceny skuteczności pasywnej wibroizolacji belek z warstwą tłumiącą w postaci materiału bitumicznego oraz gumy butylowej w konfiguracji FLD i CLD, w szerokim zakresie częstotliwości pracy,
- potrzeby eksperymentalnego określenia wpływu temperatury pracy na skuteczność pasywnej wibroizolacji najpopularniejszych materiałów tłumiących stosowanych w wszelkiego rodzaju pojazdach czy samolotach. Autor wskazuje, że producenci mat tłumiących nie udostępniają takich danych,

- dostępności w literaturze naukowej informacji z zakresu eksperymentalnego określenia stałych materiałowych stosowanych w analizach drgań (moduł zachowawczy  $E'$  i współczynnik strat  $\eta$ ) dla dostępnych i popularnych mat bitumicznych i butylowych, w różnych konfiguracjach (FLD i CLD), w różnych temperaturach i w szerokim zakresie częstotliwości. Wyznaczone parametry materiałowe posłużyły Autorowi w dalszej kolejności do przeprowadzenia symulacji numerycznych w postaci analizy harmonicznej fragmentu kadłuba samolotu. Badania numeryczne pozwoliły na określenie globalnej oceny skuteczności pasywnej wibroizolacji dla różnych wariantów geometrycznych (konstrukcja ażurowa) w strukturach lotniczych. Z analizy literatury zdaniem Autora wynika, że dotychczasowe publikacje badające wpływ geometrii materiału tłumiącego na jego zdolności dyssypacyjne dotyczą jedynie prostych przypadków.

Mając powyższe na uwadze podjęcie się tego tematu przez Autora dysertacji uważam za przejaw odwagi naukowej, gdyż Autor nie obawia się zmierzyć z materią naukową nie do końca jeszcze poznaną.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania procedury badawczej oraz przeprowadzenia badań zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych w celu określenia wpływu rodzaju materiału tłumiącego (guma butylowa oraz materiał bitumiczny), jego konfiguracji (FLD, CLD), temperatury pracy i geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji.

Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora:

- opracowania stanowiska badawczego, w tym komory cieplnej, umożliwiającej na prowadzenie badań przy różnych temperaturach pracy,
- opracowania modeli numerycznych w środowisku programu ANSYS Workbench elementów poddawanych badaniom eksperymentalnym jak i modelu fragmentu kadłuba samolotu,
- opracowania metodyki badawczej prowadzenia badań eksperymentalnych jak i wykonanie obliczeń numerycznych w tym analizę modalną i harmoniczną,
- opracowania adekwatnych programów w środowisku programu Matlab/Simulink w celu analizy zbiorów danych pomiarowych.

Opracowane metody i algorytmy zostały zweryfikowane w trakcie badań stanowiskowych. Pozyskana w wyniku prowadzonych badań doświadczalnych wiedza na autorskim stanowisku badawczym, w szczególności dotycząca określenia współczynnika strat  $\eta^*$  i modułu zachowawczego  $E'$  gumy butylowej i materiału bitumicznego stanowi oryginalne oraz nowatorskie podejście do problemu wyznaczania parametrów tłumienia mat wibroizolacyjnych. Recenzowana praca wskazuje, że Doktorant wykazał się umiejętnością łączenia wiedzy teoretycznej i praktycznej pochodzącej z wielu dyscyplin nauki, w tym: mechaniki i informatyki.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne, dotyczy bowiem istotnych zagadnień, szczególnie w aspekcie tłumienia drgań mechanicznych metodami pasywnymi. Wyniki prowadzonych prac mogą zostać wykorzystane w trakcie projektowania pojazdów samochodowych, szynowych czy konstrukcji lotniczych.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne. Autor w pracy przeprowadza wiele badań eksperymentalnych. Ich zasadność nie budzi wątpliwości natomiast metodyka postępowania w trakcie ich wykonywania nie została w pracy wystarczająco opisana. W tym np.:

- brak informacji na temat tego ile było powtórzeń badań dla danego pomiaru i dla ilu próbek (statystyka otrzymanych wyników). Z treści pracy można mieć wrażenie, że badania były przeprowadzane tylko raz i dla jednej próbki dla danego przypadku,
- w jaki sposób sprawdzane są warunki utwierdzenia badanej belki,
- w jaki sposób sprawdzono wpływ otrzymanych wyników z pomiarów na proces klejenia warstwy tłumiącej,
- czy badania opisane w rozdziale 3.2 były prowadzone dla dwóch konfiguracji orientacji belki (z warstwą wibroizolacyjną nad i pod belkę bazową), czy miało to wpływ na otrzymane pomiary,
- w jaki sposób mocowany był czujnik do powierzchni belki i z jakich przesłanek wynika miejsce jego mocowania,
- skąd pewność, że dla wyników prezentowanych w tab. 3.4 punkt pomiarowy dla któregoś „modu” nie wypada w miejscu węzła drgań,

- brak opisu prowadzonego doświadczenia najbardziej doskwiera w rozdziale 3.3. W prowadzonych badaniach czynnik temperatury był bardzo istotny. W jaki sposób kontrolowano temperaturę próbki, nie otoczenia? Skąd wiadomo, że próbka w całej swej objętości osiągnęła wymaganą temperaturę? Zwłaszcza, że guma pełni rolę izolatora termicznego. Nie podano czasu w jakim próbka pozostawała w danej temperaturze do momentu przeprowadzenia badania (współczynnik przewodzenia ciepła dla gumy to 0,16 W/mK dla aluminium to 200 W/mK).

W odniesieniu do badań modelowych:

- strona 141: dlaczego Autor pracy zdecydował się na wykonanie analizy drgań harmonicznym metodą pełną? Czym różni się metoda pełna od metody superpozycji? Skoro w dalszej części pracy autor przeprowadził identyfikację częstotliwości drgań własnych układu, to dlaczego Autor nie wykorzystał jej wyników do przeprowadzenia analizy drgań harmonicznym metodą superpozycji?,
- na stronie 144 Autor pracy przedstawił wyniki przeprowadzonej identyfikacji częstotliwości drgań własnych. Jaki jest procentowy udział wzbudzonej masy w odniesieniu do masy całkowitej analizowanego układu? Wskaźnik ten pozwala na szybką identyfikację groźnych dla układu częstotliwości drgań własnych w zależności od kierunku, na którym występować będzie obciążenie,
- rozdział 5: Autor przedstawił wyniki analizy drgań harmonicznym w postaci wykresów przedstawiających zależność przyspieszenia od częstotliwości wymuszenia. Ile wynoszą maksymalne przemieszczenia zewnętrznego poszycia oraz naprężenia zredukowane układu w zidentyfikowanej częstotliwości rezonansowej, która wzbudza największe przyspieszenie?
- strona 156: Autor napisał „Ze względu na powyższe, w przypadku projektowania wibroizolacji w konstrukcjach lotniczych konieczna jest szczegółowa analiza, która może dać odpowiedź na pytanie, czy lepiej jest zapewnić dużo lepsze tłumienie kosztem dodatkowej masy, czy też wzbudzone mody nie są na tyle krytyczne, iż można pozwolić na mniejszą dyssypację energii drgań przy jednoczesnej redukcji masy statku powietrznego.”. Określenie procentowego udziału masy układu wzbudzonej przy danej częstotliwości rezonansowej w stosunku do masy całkowitej układu może posłużyć do oszacowania tego jak dana częstotliwość rezonansowa jest niebezpieczna dla analizowanego układu.

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Drażniące w pracy jest uprzedmiotowienie słowa „tłumienie” np:

- str. 72, „Wolny koniec płaskownika niepokryty tłumieniem służył ....”.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić pozytywnie ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- wykazane przez autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne budowy modeli matematycznych i stanowisk badawczych,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.

#### 4. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, nie pomniejszają jednak osiągnięć Doktoranta w uzyskiwaniu wartościowych wyników naukowych i poznawczych. Mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i uczulić na staranność w przygotowaniu samodzielnych opracowań naukowych, wnikliwą analizę oraz zgłębianie realizowanych przez Autora problemów badawczych.

Dokładna analiza dysertacji mgr. inż. Piotra Łabuńskiego pt. „Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji” pozwala stwierdzić, iż stanowi ona wartościowy naukowo, oryginalny wkład w rozwój metod testowania materiałów wibroizolacyjnych, w tym mat wykonanych z materiału bitumicznego oraz gumy butylowej oraz pozyskiwania na drodze eksperymentalnej ich parametrów materiałowych tj. modułu zachowawczego  $E'$  oraz współczynnika strat  $\eta^*$ . Zawarte w pkt. 3 uwagi do treści rozprawy nie mają charakteru podważającego uzyskane wyniki – są prośbą o dodatkowe wyjaśnienia lub skorygowanie drobnych niejasności.

Podsumowując, to co zostało szczegółowo wykazane w niniejszej recenzji, rozprawa mgr inż. Piotra Łabuńskiego pt. „Wpływ rodzaju materiału tłumiącego, temperatury pracy oraz geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji” spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.), tj.: – prezentuje wiedzę teoretyczną oraz praktyczną Autora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna w zakresie pasywnej wibroizolacji, potwierdza umiejętność samodzielnego definiowania problematyki badań naukowych, ich prowadzenia oraz analizowania i interpretacji ich wyników, - stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania kompleksowej, numeryczno-eksperymentalnej analizy, w której określono wpływ rodzaju materiału tłumiącego (guma butylowa oraz materiał bitumiczny), jego konfiguracji (FLD, CLD), temperatury pracy i geometrii elementu tłumiącego na skuteczność pasywnej wibroizolacji, - spełnia wymogi formalne w zakresie posiadania formy monografii naukowej opatrzonej streszczeniem w języku angielskim.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Piotra Łabuńskiego do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej, rekomendując nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Stanomir Dudek